

討12 パス間での未回復ひずみを考慮した熱間変形抵抗予測モデル

川崎製鉄㈱ 技術研究所 ○齊藤良行 榎並禎一 工博 田中智夫
 水島製鉄所 井上正敏

1. 緒 言

鋼の熱間変形抵抗は、引張試験、圧縮試験、ねじり試験などの手段で測定され、それらにもとづき数式モデルが作成され、プロセス・コンピュータ (P/C) 制御にも用いられている^{1), 2)}。しかしこれら実験室での研究においては、実験条件の制約、変形様式の相違等のために、実際の圧延に適用する場合に問題がある。そこで実操業ミルを用いて系統的な実験を行い、データ解析により変形抵抗予測の数式モデルを決定すれば、その結果は圧延荷重予測にそのまま利用できるという点で望ましい。

熱間変形抵抗は高温変形による組織変化を敏感に反映する材料特性値であり、圧延温度がオーステナイト域低温側におよんだ場合、あるいはNb等の再結晶抑制元素を添加した鋼を圧延した場合には、パス間での未回復ひずみの累積効果により変形抵抗が上昇する。従来の変形抵抗の数式モデルにおいては、鋼の変形抵抗は該当パスの圧延条件のみの関数で記述されるため、上記条件には、そのままの形での適用は不可能である。そこで熱間圧延時のひずみ回復過程を簡単なモデルで表わし、ひずみの累積効果を取り入れた変形抵抗の数式モデルが必要となる。

本論文では圧延データ解析にもとづき、圧延時の組織変化を考慮して作成した熱間変形抵抗モデルの概略と、高温変形実験によるモデルの妥当性の検討結果について報告する。

2. 変形抵抗モデルの概要

筆者らの変形抵抗の数式モデルは、再結晶状態のオーステナイトの変形抵抗 k_m^0 を変形温度 T 、ひずみ ϵ 、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ の関数で記述する基本モデルと、パス間でのひずみ回復過程を微分方程式で表現したひずみ回復モデルから成り立っている。 k_m^0 は一般に $k_m^0 = f(\epsilon, \dot{\epsilon}, T)$ で表わされるが、オーステナイト域低温側のように前パスの圧延履歴が問題になる場合にはその効果を蓄積ひずみ $\Delta\epsilon$ で表わし、変形抵抗を $k_m = f(\epsilon + \Delta\epsilon, \dot{\epsilon}, T)$ のように表現し、 $\Delta\epsilon$ の計算にはひずみ回復モデルを用いる。モデルの具体的な形については次章以下にのべる。

3. 変形抵抗の基本モデル

厚板ミルで系統的な実験を行い、圧延データおよび Fourier の熱伝導方程式により計算した鋼板平均温度を利用して、統計解析を行い、基本モデルを決定した。再結晶状態のオーステナイトの変形抵抗 k_m^0 の数式モデルは次のように表わせる^{3), 4)}。

$$\ln k_m^0 = a_0 + a_1/T + a_2 \ln \epsilon + a_3 T \ln \dot{\epsilon} \dots\dots(1)$$

ただし $a_0 \sim a_3$ は定数である。

(1)式の妥当性を実験室的測定により検証するため、Gleeble 1500 を用いて熱間圧延に近い条件で高温引張変形を行い、Nb鋼 (0.17 C - 1.45 Mn - 0.031 Nb) と Si-Mn鋼 (0.18 C - 1.36 Mn) の変形応力 σ を測定した。図1~図3に示すように、 σ と T の間には $\sigma \propto \exp(A/T)$ 、 σ と ϵ の間には $\sigma \propto \epsilon^n$ 、および σ と $\dot{\epsilon}$ については $\sigma \propto \dot{\epsilon}^{mT}$ が成立することから、(1)式で示した基本モデルが妥当であることがわかる。

(1)式の定数 $a_0 \sim a_3$ は化学成分に依存すると考えられる。Nbの添加

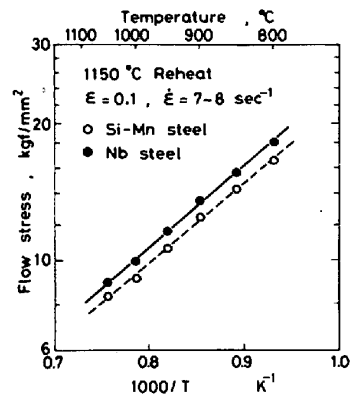


図1. 変形応力と変形温度との関係

により変形抵抗が上昇するが、これは主として a_0 値の増加によるものである。図4は変形抵抗に及ぼす固溶Nbと析出Nbの効果を高温変形実験により測定した結果である。

変形抵抗の増加率 (Si-Mn鋼基準) と、固溶Nb量あるいは析出Nb量との間には比例関係が成立する。析出Nbは固溶Nbよりも変形抵抗の上昇に大きく寄与し、0.05%の析出Nbによって17%程度変形抵抗が

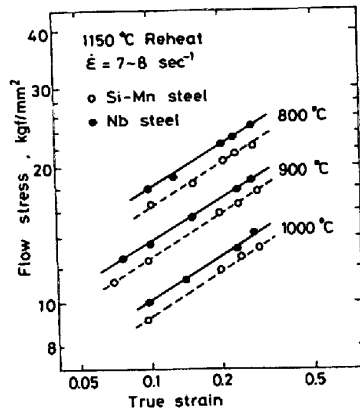


図2. 変形応力とひずみとの関係

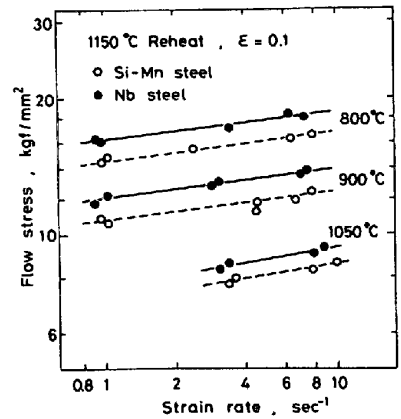


図3. 変形応力とひずみ速度との関係

上昇する。基本モデルにNbの効果をとり入れるには、図4にもとづいて計算した変形抵抗の上昇率を a_0 に付加すればよい。ひずみの回復過程におよぼすNbの影響については次章で述べる。

4. ひずみの回復モデル

4.1 蓄積ひずみの計算

圧延温度域がオーステナイト域低温側におよんだとき、あるいはNbなどの再結晶を抑制する元素を添加した鋼を圧延した場合には、通常の圧延に比べ変形抵抗が著しく上昇する。これは前パスでの加工ひずみがパス間で十分回復されず、次パスの変形抵抗に影響を与えるために生ずるものである。

このようなパス間のひずみ累積効果を、該当パスの加工ひずみ ϵ にそのパス直前の蓄積ひずみ $\Delta\epsilon$ を加えた、全ひずみ ϵ^t を、(1)式の ϵ のかわりに用いることにより表わすことができ、この考えにしたがえば、nパスでの全ひずみは、1パスから (n-1)パスまでの加工ひずみ $\epsilon_1 \sim \epsilon_{n-1}$ と各パス間のひずみ残留率 $\lambda_1 \sim \lambda_{n-1}$ を用いて次のように書きあらわせる。

$$\epsilon_t^n = \epsilon_n + \sum_{i=1}^{n-1} \left(\prod_{j=i}^{n-1} \lambda_j \right) \epsilon_i \quad \dots\dots\dots(2)$$

ただし λ_{n-1} は (n-1) ~ nパス間でのひずみ残留率で次式のように定義される。

$$\lambda_{n-1} = \Delta\epsilon_n / (\epsilon_{n-1} + \Delta\epsilon_{n-1}) \quad \dots\dots\dots(3)$$

圧延中の変形抵抗の決定値をそのまま利用して、該当パス直前の蓄積ひずみを計算する。上記の考え方によれば、実測変形抵抗 k_m^{obs} は次のように書ける。

$$\ln k_m^{obs} = a_0 + a_1/T + a_2 \ln(\epsilon + \Delta\epsilon) + a_3 T \ln \dot{\epsilon} \quad \dots\dots\dots(4)$$

したがって(1)式と(4)式により蓄積ひずみ $\Delta\epsilon$ は次式にしたがって求めることができる^{3), 4)}。

$$\Delta\epsilon = \left\{ (k_m^{obs} / k_m^0)^{1/a_2} - 1 \right\} \cdot \epsilon \quad \dots\dots\dots(5)$$

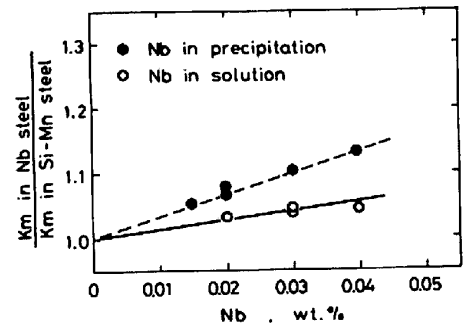


図4. 固溶Nb量および析出Nb量と変形抵抗増加率との関係

該当パスの圧延条件により k_m^{obs} , k_m^0 とも計算可能であるので、各パスの $d\epsilon$, さらに λ も容易に求められる。

以上のことからひずみ残留率 λ に対する数式モデルを得ることができれば、実圧延データとの対比により、具体的な係数を決定することによって、広範囲の圧延条件にわたる変形抵抗の予測が可能である。

4.2 ひずみ回復モデルによるひずみ残留率の計算

回復途上での結晶粒内での転位密度の変化を微分方程式で記述し、回復途上の転位密度と残留ひずみとの間に線型な関係を仮定し、さらに Arrhenius 型の温度依存性があると考えれば、パス間でのひずみの時間変化は次のように表わすことができる^{3), 4)}。

$$\frac{d\epsilon}{dt} = - \exp\left(-\frac{Q}{T}\right) \sum_{n=1}^{N_0} c_n \cdot \epsilon^n \dots\dots\dots (6)$$

$c_1 \sim c_{N_0}$, Q は定数で、 Q は見かけの活性化エネルギーに相当する。また N_0 は正の整数である。

通常の圧延の場合、パス間での粒内の転位密度の変化を定量的に考える場合、異符号の転位合体による消滅、粒界での転位の吸収を考えればよく、これらの効果による単位時間あたりの転位密度の減少はそれぞれ ρ^2 および ρ に比例する⁶⁾。また Nb のような析出物形成元素の効果を定数、特に Q にくみ入れることにすれば、 $N_0 = 2$ で十分圧延中の回復過程を記述できる。この場合の(6)式の解は簡単に求積法で求められる。(n-1)パスとnパス間の回復過程に注目し、解を λ_{n-1} で表現すれば次式のようになる。

$$\lambda_{n-1} = \frac{c_1}{[c_2(\epsilon_{n-1} + d\epsilon_{n-1}) + c_1] \exp[c_1 \cdot t_{OM} \cdot \exp(-Q/T)] - c_2(\epsilon_n + d\epsilon_{n-1})} \dots\dots\dots (7)$$

ただし t_{OM} はパス間時間である。

(7)式によれば、ひずみ残留率 λ は変形温度、パス間保持時間、予ひずみ量に依存する。Nb 鋼および Si-Mn 鋼について二段変形試験により λ に対する変形温度、保持時間の影響を求め、(7)式の妥当性を検討した。図5は 800°Cあるいは900°Cで0.2の予ひずみを与えた後、等温保持した場合の λ の変化をプロットしたものである。二段変形の各段の変形応力を実測し、(1), (3), (5)式を用いて λ を求めた。図中には同一条件でのひずみ回復挙動を(7)式より求めた計算値をあわせて示す。(7)式の係数は熱間圧延データ解析により決定したものである。変形様式の相違にかかわらず両者はよい一致を示す。

Nb 鋼は Si-Mn 鋼に比べて著しい回復の遅れを示すが、これは主として見かけの活性化エネルギーの違いによるものと考えられる。二段変形実験により求めた Nb 鋼および Si-Mn 鋼の見かけの活性化エネルギー Q の値はそれぞれ、52.1 Kcal/mol および 47.1 Kcal/mol と、Nb 鋼の方が 5 Kcal/mol ほど大きく、Nb による回復遅延効果が Q においても明瞭に現われる。

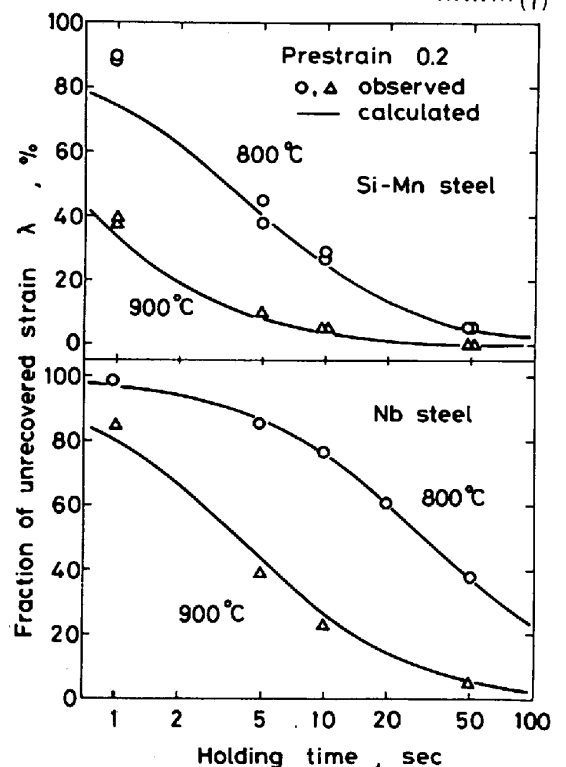


図5. 等温保持中のひずみ残留率の計算値と高温変形実験結果との比較

5. 圧延中の組織変化にともなう変形抵抗の変化

圧延中に生ずる組織変化のうち、変形抵抗に影響をおよぼすと考えられる因子は、オーステナイト (r) 粒径の変化と Nb などの炭窒化物形成元素を含む場合に起こるひずみ誘起析出である。

変形前の r 粒径の変形応力への効果を測定し、結果を図 6 に示す。実験条件がほとんど類似である大内ら⁵⁾の結果も同時にプロットした。 r 粒の微細化により変形抵抗が上昇することがわかるが、この効果は(1)式の係数に間接的に含まれているものと考えられる。

ひずみ誘起析出物の効果は(7)式を計算する際に考慮され、主として蓄積ひずみ $\Delta \epsilon$ の中に含まれると考えられるが、(1)式の係数にも間接的に含まれていると思われる。

変形抵抗に及ぼす r 粒径およびひずみ誘起析出物の効果を定式化すること、およびこれらの変化の過程を記述する数式モデルを開発することは今後の課題である。

現状の圧延条件と極端に異なる圧延を行わない限り、圧延荷重予測に関しては、筆者らの間接的なモデルで問題はないと思われる。

6. 変形抵抗モデルの P/C への適用と精度

上記の変形抵抗モデルを厚板ミルの P/C に導入し、圧延荷重の予測を行った。

圧延荷重予測精度は実測圧延荷重と予測圧延荷重の比 FCF で評価される。図 7 は圧延中の各パスの FCF の分布を示しているが、圧延荷重の予測精度がきわめてすぐれていることがわかる。

7. 結 言

再結晶オーステナイトの変形抵抗を変形温度、ひずみ量、ひずみ速度の関数で表わす基本モデルと、ひずみ回復過程を微分方程式で表現したひずみ回復モデルからなる変形抵抗の数式モデルを確立した。モデルの妥当性は高温変形実験により検証され、各モデルに対する Nb の効果も明らかになった。さらにこのモデルを用いた圧延荷重予測精度はきわめてすぐれていることが確認された。

文 献

- 1) 美坂, 吉本: 塑性と加工, 8 (1967) 414
- 2) 志田: 塑性と加工, 10 (1969) 610
- 3) 斉藤, 木村, 磯辺, 榎並, 坪田, 井上, 馬場: 川鉄技報, 12 (1980) 243
- 4) Y. Saito, N. Koshizuka, C. Shiga, T. Sekine, T. Yoshizato & T. Enami: Proc. Internl. Conf. on Rolling, (1980), Tokyo, 1063
- 5) 大内: 塑性と加工, 18 (1977) 867
- 6) R. Sandström: Acta Met., 25 (1977) 45

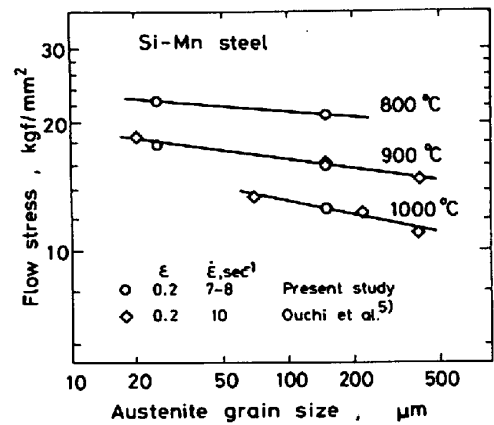


図 6. 変形応力におよぼす r 粒径の影響

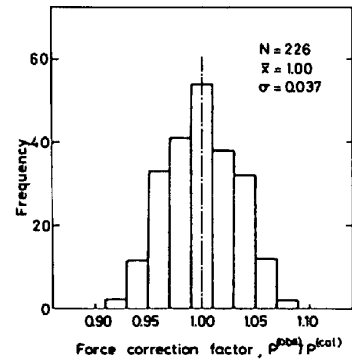


図 7. 圧延中の各パスでの FCF の分布